

УДК 624.131.37, 624.131.537

ДОСЛІДЖЕННЯ ХІМІЧНОЇ СУФОЗІЇ В ПІЩАНИХ ТА СУГЛИНИСТИХ ҐРУНТАХ І ЇЇ ВПЛИВ НА СТІЙКІСТЬ ОСНОВ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

А. І. БІЛЕУШ, М. Г. БУГАЙ, В. Л. ФРІДРІХСОН, В. В. КРИВОНОГ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
03680 Київ – 180, МСП, вул. Желябова, 8/4
igmgs@ukr.net

Одержано 07.04.2014

Наведено результати експериментальних досліджень кінетики розчинення та виносу солі з нез'язного ґрунту. На підставі експериментальних досліджень отримано залежність між коефіцієнтом розчинення мінералу і швидкістю фільтрації та початковим об'ємним вмістом солі в ґрунті. Також наведено результати дослідження міцності засолених ґрунтів на приладі крутіння. Отримано, що міцність ґрунтів значно зменшується до початку розвитку суфозії та виносу солей тільки в наслідок підвищення вологості ґрунту. Таке зменшення міцності в залежності від початкової щільності ґрунту може перевищувати 50 %. Доведено, що при хімічній суфозії відбувається порушення мікроагрегатної структури ґрунтів, яке викликає зменшення їх міцності в зоні зсуву. У природних умовах таке явище суттєво впливає на пружно-деформований стан ґрунтів та призводить до зменшення стійкості основ інженерних споруд, схилів, дамб і штучних укосів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: хімічна суфозія, розчинення, винос солей, міцність ґрунтів

Приведены результаты экспериментальных исследований кинетики растворения и выноса соли из несвязного грунта. На основании экспериментальных исследований получена зависимость между коэффициентом растворения минерала и скоростью фильтрации и начальным объемным содержанием соли в грунте. Также приведены результаты исследований прочности засоленных грунтов на приборе кручения. Получено, что прочность грунтов значительно уменьшается до начала развития суффозии и выноса солей только в результате повышения влажности грунта. Такое уменьшение прочности в зависимости от начальной плотности грунта может превышать 50 %. Доказано, что при химической суффозии происходит нарушение микроагрегатной структуры грунтов, которое вызывает уменьшение их прочности в зоне сдвига. В естественных условиях такое явление существенно влияет на упруго-деформованное состояние грунтов и приводит к уменьшению устойчивости оснований инженерных сооружений, склонов, дамб и искусственных откосов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: химическая суффозия, растворение, вынос соли, прочность грунтов

Presented are the results of experimental research on the kinetics of dissolution and salt removal from non-cohesive soil. Experimental research show relationship between mineral dissolution coefficient and speed of filtration and starting volume content of ground salt. Also presented are the results of tests of strength of saline soils with torsion device. It was determined that ground coat rigidity significantly decreases before the development of subsoil erosion and salt erosion only as a result of ground coat wetness increase. Such a rigidity decrease depending on starting ground coat rigidity can be more than 50 %. It is proven that the chemical suffusion leads to changes in micro-aggregate soil structure, which causes a decrease in their strength in the shear zone. Under natural conditions, this phenomenon leads to a decrease in the stability of the foundations of engineering structures, slopes, dams and artificial slopes.

KEY WORDS: chemical suffusion, dissolution, salt removal, ground coat

ВСТУП

При оцінках стійкості основ споруд, укосів чи схилів значну увагу при інженерно-геологічних дослідженнях приділяють виявленню інженерно-геологічних елементів порід, в яких при певних умовах можуть розвиватись механічні чи хімічні суфозійні процеси. Проектування об'єктів у таких умовах проводять на основі спеціальних інженерних і інженерно-геологічних досліджень, якими встановлюють можливість прояву суфозії, визначають величину, характер і інтенсивність протікання суфозійних процесів. При цьому велика увага приділяється вдосконаленню методів визначення водопроникності і місцевої фільтраційної стійкості

ґрунтів, на яких зводяться споруди, або ж ґрунтів, які використовуються як будівельний матеріал.

Експериментальні дослідження, які проведено в провідних наукових організаціях колишнього СРСР (САНІІРИ, Інститут споруджень АН Узб.ССР, ВНИИВОДГЕО, МГУ, ГрузНИИГиМ, ВНИИГ, ТНГИСТЭИ, СоюздорНИИ [1–4]), показали, що присутність в ґрунтах водорозчинної солі як в твердому, так і в розчинному стані обумовлює особливі фізико-механічні якості ґрунтів в порівнянні з незасоленими ґрунтами. Такі ґрунти під дією фільтраційного потоку розсолуються і в подальшому змінюють свої фізико-механічні властивості [5].

Опір зсуву. Опір зсуву дуже засолених ґрунтів

(до 10 % солей) залежить, головним чином, від щільності та вологості:

1) водонасичені ґрунти при об'ємній вазі сухо-го ґрунту $\gamma_c < 1.7 \text{ т/м}^3$ характеризуються опором зсуву на 10–15 % меншим, ніж такі ж незасолені ґрунти;

2) при $\gamma_c < 1.7 \text{ т/м}^3$ легкорозчинні солі, незалежно від їх кількості, майже не впливають на величину опору зсуву;

3) гіпс посилює опір зсуву;

4) у ґрунтах, які вилугуюються, опір зсуву залежить від їх щільності та вологості.

Стисливість і просадка. Легкорозчинні солі як у твердому стані, так і у вигляді розчинів сприяють стисливості ґрунтів; важкорозчинні солі гальмують цей процес.

В засолених ґрунтах легкого й середнього гранулометричного складу розчинення та винос солей сприяють зростанню додаткової осадки ґрунту, яку визначають експериментальним шляхом по кривій осідання вилуженого ґрунту, який знаходиться під тиском і гідравлічним напором.

В режимі фільтрації ненасиченою маломінералізованою ґрунтовою водою в засолених ґрунтах спостерігається сольова суфוזія, яка може спричинити механічну суфוזію.

Основні закономірності розсолнення ґрунтів. Інтенсивність процесу зміни фізико-механічних характеристик засолених ґрунтів при фільтрації визначається швидкістю розчинення солей і виносу їх з ґрунту.

Дослідження А.Е. Орадовської (ВНИИ ВОДГЕО) вилугування гіпсу при фільтрації в породах, в яких гіпс знаходиться в дисперсно-розподіленому стані, показали, що при розсолненні такого ґрунту в напрямку фільтраційного потоку протягом деякого часу утворюються три зони:

I – зона, де сіль уже винесена, тобто об'ємний вміст гіпсу в ґрунті $\zeta = 0$, а концентрація гіпсу у фільтруючій воді $C = C_o$, де C_o – концентрація гіпсу у воді на вході;

II – активна зона, в межах якої відбувається розчинення і винос гіпсу з ґрунту і поступове насичення фільтруючої води гіпсом. В цій зоні $0 \leq \zeta \leq \zeta_o$ і $C_o \leq C \leq C_n$, де ζ_o – початковий об'ємний вміст гіпсу в ґрунті, C_n – концентрація при насиченні гіпсом фільтруючої води;

III – зона невилуженої породи, через яку проходить насичена гіпсом вода ($C \approx C_n$), де відсутнє розчинення і зберігається початковий вміст гіпсу ($\zeta = \zeta_o$).

Розглянута модель переміщення гіпсу фільтруючим потоком, для якої характерна чітка границя між зоною I, яка витискає, і зоною II, яка витиска-

ється, характеризує конвективний масоперенос як гідравлічний перенос фільтраційним потоком.

Згідно прийнятої моделі, швидкість вилугування засоленого ґрунту визначається швидкістю переміщення нижньої границі зони I, тобто швидкістю збільшення товщини вилуженого ґрунту.

При сталій швидкості фільтрації в однорідно загипсованих ґрунтах ця границя переміщується рівномірно зі швидкістю розсолнення $\nu_{роз}$, яка визначається за формулою

$$\nu_{роз} = \frac{k(C_n - C_o) \nu_{\phi}}{\zeta_o \gamma_{гип}}, \quad (1)$$

де $\gamma_{гип}$ – об'ємна вага гіпсу, г/см^3 ; ν_{ϕ} – швидкість фільтрації, см/с ; C_n , C_o – концентрація в г/см^3 ; k – експериментальний коефіцієнт, який дорівнює 1.26.

В реальних гідрогеологічних (гідрохімічних) умовах конвективний перенос супроводжується молекулярно-дифузними процесами. Сукупність двох видів переносу описується поняттям конвективної (або фільтраційної) дифузії, процес якої обумовлює накладення молекулярної дифузії на гідравлічне (конвективне) переміщення розчину.

Процес формування хімічного складу підземних вод є гетерогенним, тому що в його основі лежить міжфазова взаємодія в системі "підземна вода–порода" і включає декілька стадій:

- перенос речовини до поверхні;
- хімічна або фізична взаємодія на границі розмежування фаз;
- відвід утвореної в результаті взаємодії речовини в об'єм розчину [6].

При аналізі процесів масопередачі, коли є міжфазова взаємодія в зовнішньодифузній області, використовують узагальнене рівняння, яке отримано на основі градієнтного закону Фіка:

$$Q = \beta(C_s - C_o), \quad (2)$$

де Q – питомий потік речовини через одиницю поверхні шару розчину, який безпосередньо контактує з твердою фазою, за одиницю часу, $\text{г/см}^2 \cdot \text{с}$; $C_s - C_o$ – різниця концентрацій речовини в контактному шарі розчину і в його об'ємі; β – коефіцієнт масовіддачі.

Замість коефіцієнта масовіддачі β вводять коефіцієнт масопередачі ρ , а замість C_s приймають концентрацію насиченого розчину C_n , який рівноважний за компонентами, що досліджуються, з даною твердою фазою.

Приведені вище коефіцієнти β і ρ – не фізична константа, а кінетична характеристика, яка узагальнює сумарний ефект конвективного

і молекулярно-дифузного масопереносу, а також гетерогенної взаємодії. Величина останньої залежить від багатьох змінних і визначається в основному експериментальним шляхом.

В кінцевому вигляді рівняння (2) можна записати таким чином:

$$Q = \rho(C_n - C_o). \quad (3)$$

При проведенні експериментальних досліджень хімічної суфозії засоленого ґрунту, результати яких наводимо нижче, була прийнята модель конвективної дифузії.

Мета дослідження – вивчення впливу засолення ґрунту на його фізико-механічні властивості, в першу чергу опору зсуву, і кінетики розчинення та виносу солі з ґрунту.

Експериментальні дослідження хімічної суфозії

В якості ґрунту було взято дрібнозернистий пісок, а в якості добре розчинного мінералу – сіль NaCl. Для відповідності гранулометричного складу солі гранулометричному складу дрібнозернистого піску сіль було попередньо просіяно крізь сито 0.63 мм. Готувались зразки ґрунту з вмістом солі за вагою $\xi = 5, 10$ і 15 %.

Суміш ґрунту закладали в фільтраційний прилад типу Дарсі діаметром 100 мм в сухому стані і пошарово ущільнювали, доводячи до товщини зразка в межах $h = 52\text{--}56$ мм і об'ємної ваги $\gamma = 1.66\text{--}1.75$ г/см³.

За допомогою важільної системи на зразок надавали тиск $\sigma = 0.11$ МПа і після стабілізації деформації зразка, яка фіксувалась індикатором часового типу з точністю 0.01 мм, приступали до замочування зразка. Замочували зразок знизу догори максимально насиченим розчином NaCl концентрацією $C_n = 36$ % або 0.36 г/см³ (розчинили 36 г NaCl в 100 см³ чистої води) [6].

Після завершення замочування зразка підключали систему подачі води кімнатної температури. Процес розсолення проводили при фільтрації в напірному режимі знизу догори. Сталу швидкість фільтрації підтримували за допомогою регулятора швидкості. Відбір проб фільтрату для контролю процесу розсолення в залежності від швидкості фільтрації проводили за певні проміжки часу $\Delta t_i = 15\text{--}23$ хв., концентрацію фільтрату визначали за допомогою завчасно витаруваного ареометра.

В процесі дослідження фіксували: момент підходу чистої води до нижньої границі зразка, який приймали за початок розсолення зразка; момент виносу із зразка насиченого розчину, який був за-

трачений на замочування зразка; момент, коли у фільтраті фіксували концентрацію $C = 0$, який приймали за закінчення процесу розсолення зразка.

За результатами досліджень отримано графічні залежності (рис. 1–4).

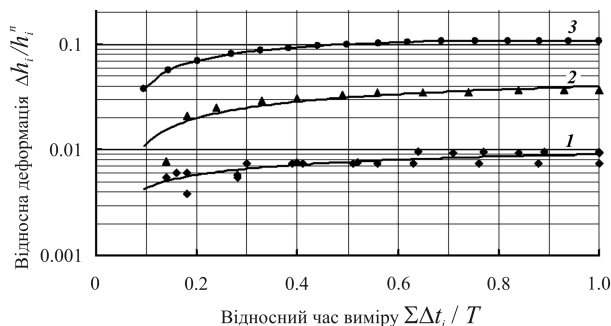


Рис. 1. Графік залежності $\frac{\Delta h_i}{h_i^n} = f\left(\frac{\sum \Delta t_i}{T}\right)$:

1 – $\xi = 5$ % солі; 2 – $\xi = 10$ % солі; 3 – $\xi = 15$ % солі

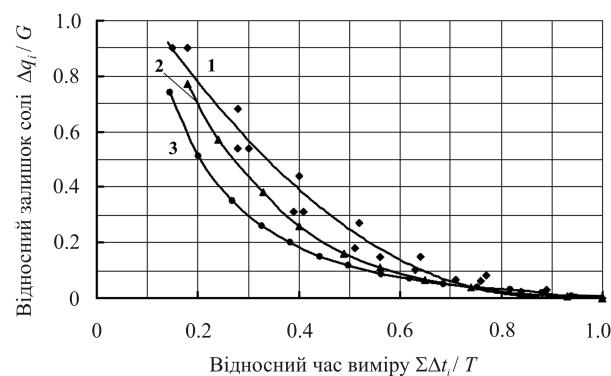


Рис. 2. Графік залежності $\frac{\Delta q_i}{G} = f\left(\frac{\sum \Delta t_i}{T}\right)$:

1 – $\xi = 5$ % солі; 2 – $\xi = 10$ % солі; 3 – $\xi = 15$ % солі

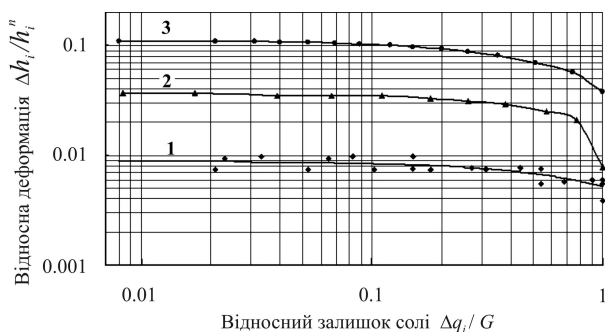
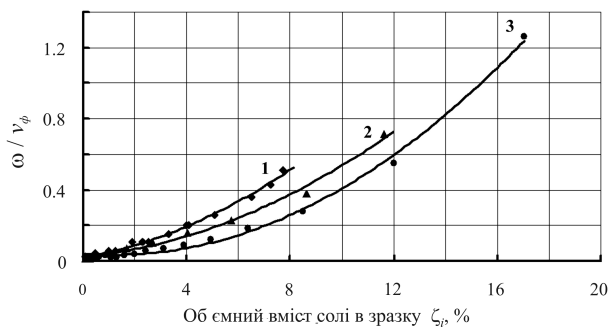
Як бачимо з залежності $\frac{\Delta h_i}{h_i^n} = f\left(\frac{\sum \Delta t_i}{T}\right)$, рис.

1, величина деформації засоленого ґрунту залежить від вмісту солі в зразку. Тут $\Delta h_i = h_i^n - h_i$; $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$; h_i – товщина зразка на момент t_i ; h_i^n – товщина зразка на момент початку розсолення; T – тривалість процесу розсолення зразку. Підсумкові результати дослідження зразків приведено в таблиці.

При 5 % вмісту солі в зразку за вагою величина деформації складає 3.8–4.2 % від початкової товщини зразка, при 10 % – зразок стискається на 8.1 %, при 15 % – на 16 % (табл.). Для порівняння, при фільтрації чистої води через незасолений

Табл. 1. Результати дослідження деформації зразків ґрунтів

Характеристика зразка			Стиснення (осадка) зразка, мм/%			Кінцева об'ємна вага зразка, γ , г/см ³
Початковий вміст солі в зразку по вазі ζ , %	Початкова об'ємна вага, γ , г/см ³	Початкова товщина при $\sigma = 0.11$ МПа	Після замочування, $h_{\text{зам}}$	На момент початку розсолення, $h_{\text{роз}}$	Після розсолення, $h_{\text{роз}}$	
5	1.75	53.3	0.94/1.8	1.46/2.7	1.96/3.8	1.72
5	1.67	56.1	0.9/1.6	2.0/3.6	2.38/4.2	1.66
5	1.66	56.4	0.7/1.2	1.87/3.3	2.36/4.2	1.65
10	1.71	53.7	0.8/1.5	2.50/4.6	4.37/8.1	1.68
15	1.66	56.1	1.44/2.6	3.3/5.9	9.0/16	1.68
При замочуванні і фільтрації чистою водою						
0	1.69	54.2	0.18/0.53		0.215/0.4	1.70

Рис. 3. Графік залежності $\frac{\Delta h_i}{h_i^n} = f\left(\frac{\Delta q_i}{G}\right)$:1 – $\xi = 5$ % солі; 2 – $\xi = 10$ % солі; 3 – $\xi = 15$ % соліРис. 4. Графік залежності $\frac{\omega}{\nu_{\phi}} = f(\zeta_i)$:1 – $\xi = 5$ % солі; 2 – $\xi = 10$ % солі; 3 – $\xi = 15$ % солі

дрібнозернистий пісок величина деформації останнього складає 0.4 %.

При засоленості зразка 5 % основна деформація відбувається ще до моменту початку розсолення. На цей момент вона становить 74–84 % від її кінцевого значення (в момент повного розсолення

зразка). При засоленості зразка 10 % величина деформації на момент початку розсолення становить 57 % від її кінцевого значення, а при засоленості 15 % величина деформації становить 36.7 % від її кінцевого значення.

Слід відмітити, що після розсолення ґрунту його об'ємна вага у порівнянні з початковою величиною змінюється в межах ± 1 %.

На рис. 2 наведено залежність виносу солі із зразка в часі $\frac{\Delta q_i}{G} = f\left(\frac{\sum \Delta t_i}{T}\right)$, яка має асимптотичний характер, що характеризує нерівномірний винос солі із зразка в часі. Тут $\Delta q_i = G - \sum q_i$, $\sum q_i$ – кількість солі, яку винесли з зразка фільтру за період $\sum t_i$; G – загальна кількість солі в зразку. Кількість розчиненої солі, яка виноситься, залежить від її вмісту в зразку: при 15 % – max, при 5 % – min.

Досліди не показали прямої залежності між об'ємом виносу солі і величиною стиснення, рис. 3.

Кінетика розчинення мінералу NaCl підпадає під поняття конгруентного розчинення, тобто спостерігається проста дисоціація речовини в розчині на іони $\text{NaCl} \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$.

Такий мінерал як NaCl має зовнішньо-дифузний механізм розчинення. Основний закон його розчинення може бути описаний таким виразом [6]:

$$Q = \omega (C_n - C_i), \quad (4)$$

де ω – коефіцієнт швидкості розчинення, який залежить від кінетичного механізму розчинення, см/с; C_n – концентрація при насиченні розчину, $C_n = 0.36$ г/см³; C_i – концентрація реально розчину, г/см³; Q – питомий потік речовини з одиниці площі поверхні розчинення, г/см²·с.

Відомо, що процес конгруентного розчинення залежить від швидкості течії підземних вод, тому що збільшення швидкості течії підземних вод призводить до збільшення конвективної дифузії і, як наслідок, – до більш активного відводу продуктів розчинення, тобто прискорює розсолення ґрунту. В кінцевому підсумку концентрація речовини, що розчиняється, зменшується, а це призводить до збільшення різниці величини недонасичення ($C_n - C_i$), яка є рухомою силою процесу розчинення [6].

Враховуючи, що процес розсолення залежить не тільки від швидкості фільтрації, а і від багатьох змінних (наприклад, від вмісту солі в ґрунті ξ , рис. 2), запишемо рівняння (4) в такому вигляді:

$$\frac{Q}{C_n - C_i} = \omega \quad (5)$$

і по експериментальним даним побудуємо залежність $\omega/\nu_{\text{ф}} = f(\xi_i)$, по якій визначимо функціональну залежність коефіцієнта швидкості розчинення від швидкості фільтрації $\nu_{\text{ф}}$ і вмісту солі в ґрунті ξ_i .

Залежність $\omega/\nu_{\text{ф}} = f(\xi_i)$ (рис. 4) може бути описана степеневою функцією $y = ax^b$.

Методом найменших квадратів були визначені параметри a і b для зразків з різним початковим вмістом солі по вазі:

- при $\xi = 5\%$ $a = 0.02$, $b = 1.5$;
- при $\xi = 10\%$ $a = 0.015$, $b = 1.5$;
- при $\xi = 15\%$ $a = 0.008$, $b = 1.85$.

В кінцевому вигляді процес розчинення мінералу NaCl в зразку і розсолення останнього можна записати рівнянням

$$Q = a\nu_{\text{ф}}\xi_i^b (C_n - C_i), \quad (6)$$

де значення коефіцієнтів $a = 0.008\text{--}0.02$ і $b = 1.5\text{--}1.85$ залежить від початкового об'ємного вмісту солі в ґрунті.

Вплив хімічної суфозії на таку фізико-механічну характеристику ґрунту, як опір зсуву, було експериментально досліджено на приладі крутіння [7].

Методика проведення дослідів включала підготовку зразка певної щільності і вологості та дослідження його міцності на зріз у приладі крутіння. Досліди проводили при такій самій величині вертикальних стискуючих напружень, при яких виконано досліди по розсолюванню ґрунту під дією фільтрації ґрунтових вод.

Нижче, на рис. 5–9, наведено результати окремих дослідів по визначенню міцності ґрунту в залежності від низки факторів: щільності, засолено-

сті, фільтрації та ін.

На рис. 5–7 представлено результати досліджень на міцність дрібного піску в залежності від кількості солі в ґрунті. На графіках, де наведено результати досліджень, площину графіків розбито на три зони. В зоні 1 досліди проводили при незначній незмінній вологості ґрунту. Після досягнення в досліді граничного стану ґрунту, коли опір зі збільшенням деформації практично не змінювався, підключали установку по замочуванню ґрунту (зона 2). Замочування проводили насиченим розчином солі з метою уникнення можливості розчинення солі, яка знаходиться в ґрунті.

Після того, як ґрунт було повністю замочено, включали фільтраційну установку. Фільтрація проходила прісною водою (зона 3). При проведенні досліджень у трьох дослідах мала місце дилатансія.

Дані досліджень, що наведено на рис. 5–7, показують залежність міцності від кількості солі та щільності ґрунту. Так, при збільшенні кількості солі і зменшенні щільності ґрунту його гранична міцність зменшується.

На рис. 8–9 представлено результати досліджень на міцність супіску в залежності від кількості солі в ґрунті. Дані досліджень, що наведено на цих рисунках, показують відсутність у дослідах дилатансії. При цьому гранична міцність ґрунту при зволоженні значно зменшується.

Збільшення кількості солі в ґрунті призводить при його замочуванні до значного зменшення міцності ґрунту – в 3–4 рази (рис. 9).

При визначенні довготривалої міцності, на наш погляд, ще недостатньо враховується механічна і хімічна суфозія в ґрунтах, яка впливає на фільтраційну стійкість основ гідротехнічних споруд, укосів і схилів. Такі самі проблеми притаманні меліоративним каналам на півдні України, укосам гребель гідроелектростанцій Дніпровського каскаду, схилам Дніпра в м. Києві та ін., які при довготривалій дії фільтраційного потоку і дії суфозії можуть викликати аварійні ситуації.

Дослідження фільтрації та стійкості укосів дамби Північно-Кримського каналу

Ділянка каналу, яку досліджували, знаходиться в Красноперекіпському районі у степовій частині Криму [8].

Побудований канал проходить у напіввиїмці–напівнасіпу, а при переході над місцевими пониженнями рельєфу (лог, балки, русло водотоку) – повністю в насипу.

Уздовж каналу прокладена територіальна автомобільна дорога. Паралельно на відстані 200–250 м проходить магістральна залізниця держав-

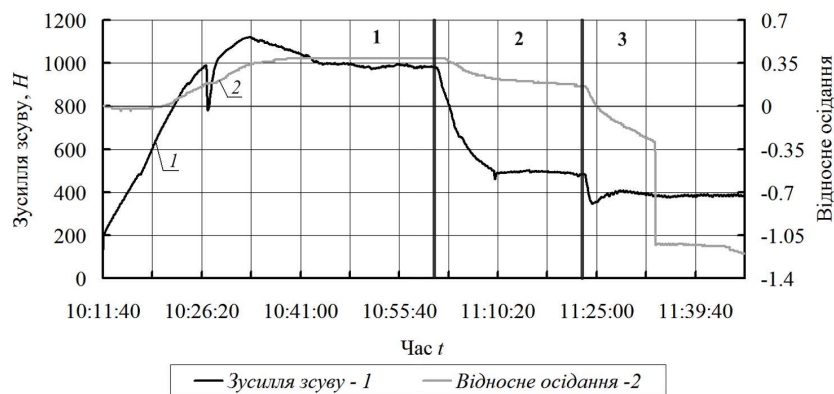


Рис. 5. Зміна міцності дрібнозернистого засоленого піску при замочуванні розсолон і фільтруванні прісної води (5 % солі, $\gamma_{зр} = 1.67 \text{ г/см}^3$, $P = 0.3 \text{ МПа}$, $V = 0.5 \text{ мм/хв}$)

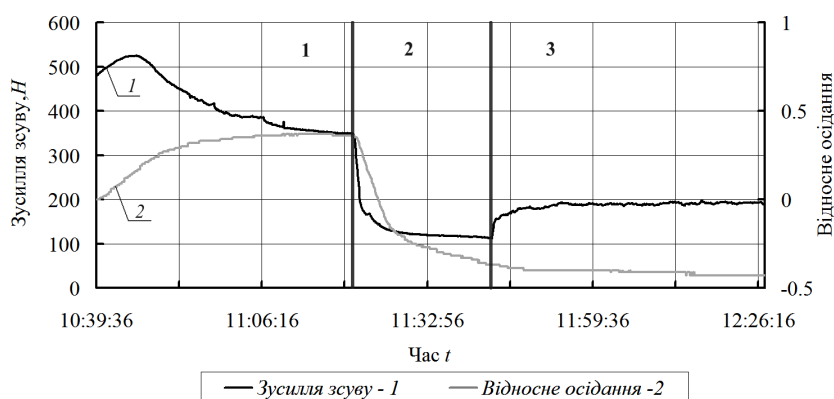


Рис. 6. Зміна міцності дрібнозернистого засоленого піску при замочуванні розсолон і фільтруванні прісної води (15 % солі, $\gamma_{зр} = 1.52 \text{ г/см}^3$, $P = 0.11 \text{ МПа}$, $V = 0.5 \text{ мм/хв}$)

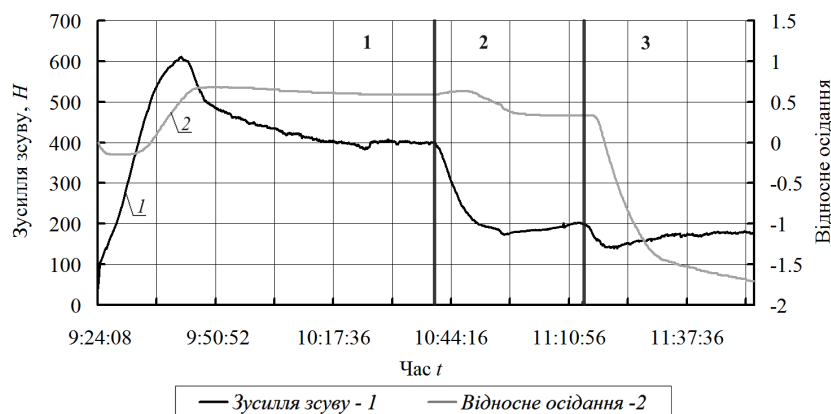


Рис. 7. Зміна міцності дрібнозернистого засоленого піску при замочуванні розсолон і фільтруванні прісної води (10 % солі, $\gamma_{зр} = 1.56 \text{ г/см}^3$, $P = 0.05 \text{ МПа}$, $V = 0.5 \text{ мм/хв}$)

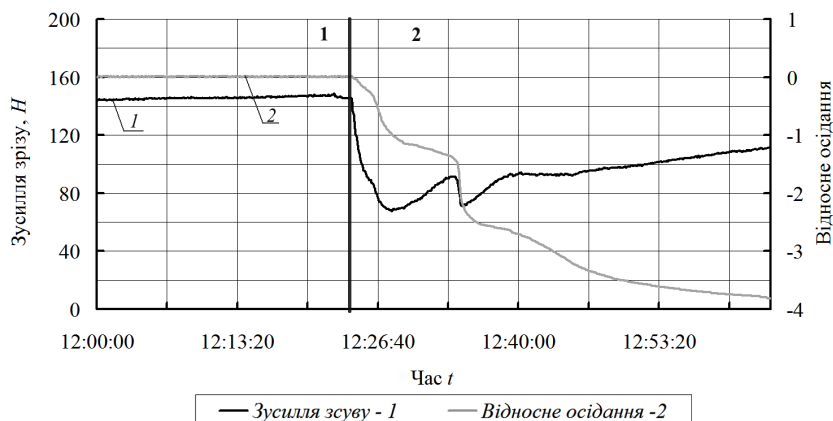


Рис. 8. Зміна міцності засоленого супіску при замочуванні розсолон (5 % солі, $\gamma_{zp} = 1.46 \text{ г/см}^3$, $P = 0.11 \text{ МПа}$, $V = 0.1 \text{ мм/хв}$)

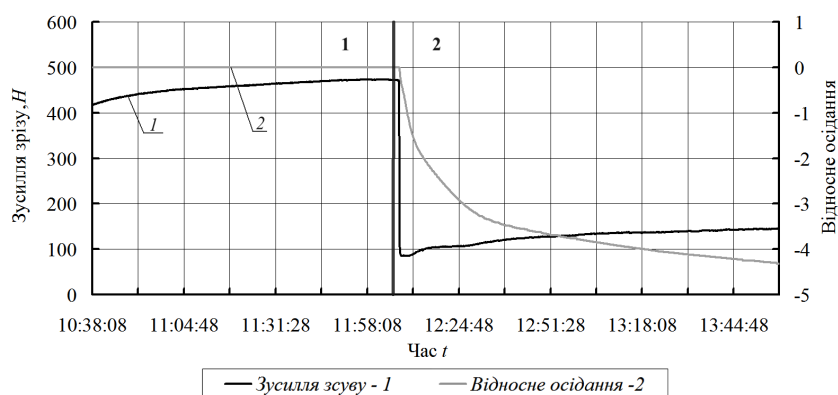


Рис. 9. Зміна міцності засоленого супіску при замочуванні розсолон (10 % солі, $\gamma_{zp} = 1.48 \text{ г/см}^3$, $P = 0.11 \text{ МПа}$, $V = 0.1 \text{ мм/хв}$)

ного значення.

Внаслідок суфозії, яка мала місце останні роки по загіпсованим ходам в основі насипу укосів каналу, в жовтні 2002 р. відбулося просідання полотна автомобільної дороги. По матеріалам спостережень управління експлуатації каналу на протязі 2002 р. збільшились фільтраційні витрати крізь тіло дамби. На час першого обстеження вказаної ділянки на початку 2003 р. територія між автомобільною дорогою і насипом залізничної дороги була заболоченою.

В геоморфологічному відношенні ділянка розміщується в межах Присивашської акумулятивної низовини. Поверхня землі полого, з перепадом абсолютних позначок від 0.5 до 8.0 м. На дамбі каналу перепад зростає до 13.8 м.

В геологічній будові даної ділянки приймають участь сучасні елювіальні відклади (eIV), які з поверхні (а також під дамбою) перекриті ґрунтово-

рослинним шаром; суглинками середніми, темно-та брунатно-сірими, гумусоватими, із кореннями рослин, потужністю шару 0.2–0.6 м, рідко до 1.0 м.

Тіло дамби каналу складають сучасні техногенні утворення (tIV) – насипні ґрунти: перевідкладені лісовидні суглинки, середні червонувато-буруваті-брунатні. Вони мають включення подових відкладів карбонатів (до 15.1 %), слабо-загіпсовані (3.3 %), слабо-засолені, напівтверді та тугопластичні.

Нижче по розрізу залягають середньо-четвертинні еолово-делювіальні (vdII) суглинки середні, лісовидні, жовто-брунатні з включенням карбонатів до 14 %, загіпсовані 13.3 %, сильно засолені, потужність відкладів до 3.6 м.

На ділянці також мають місце подові відклади, суглинки важкі зеленувато-сірі з включенням карбонатів (21.1 %) та гіпсу (4 %).

Нижче залягають нижньо-четвертинні еоло-

делювіальні (vdI) лісовидні суглинки, середні й важкі, червокуваті–коричневі, з включенням карбонатів (15.7 % і 13.9 %) та гіпсу (3.5 %). Консистенція середніх суглинків м'якопластична і тугопластична, важких – піропластична до напівтвердої. Потужність шару, відповідно, 2.4–3.7 м та 2.2 м і більше 10 м.

Гідрогеологічні умови в межах ділянки протифільтраційних заходів характеризуються трьома водоносними горизонтами:

- в четвертинних відкладах;
- у відкладах кимерій–куяльницького ярусу;
- у вапняках понтичного ярусу.

З практичної точки зору насамперед треба звернути увагу на водоносний горизонт у четвертинних відкладах. Цей водоносний горизонт залягає на глибинах 0.25–5.0 м. Ухил ґрунтового потоку має орієнтацію в сторону озера Сиваш. Глибина залягання рівня цього горизонту в межах правої дамби 7.0–9.5 м. Відносним водопором можна вважати важкі суглинки, регіональним – пліоцен–нижньо–четвертинні глини. Горизонт безнапірний. Живлення відбувається за рахунок фільтрації з каналу та атмосферних опадів. Мінералізація води коливається в межах 2.1–6.02 ‰. Води – сульфатні і сульфатно-хлоридні, магнієво-кальцієво-натрієві. Мінералізація води в каналі 0.4–0.5 г/л. Вода – сульфатно-гідрокарбонатно-хлоридна, кальцієво-магнієва. Будівництво ПКК дещо змінило гідрогеологічні умови на даній ділянці, особливо в четвертинних відкладах.

При будівництві гідротехнічних споруд змінюється гідродинамічний режим ґрунтових вод. В масив ґрунтових основ, що включають гіпси, інфільтруються води, недонасичені сульфатом кальцію. Такі ґрунтові води створюють умови для інтенсивного розчинення гіпсу. З часом таке явище збільшує тріщинуватість і водопроникливість порід, що викликає збільшення швидкості ґрунтових вод, інтенсивності розчинення гіпсів, суфозії і фільтраційних деформацій.

Дослідження фільтрації та стійкості укосів дамб каналу в даній статті наведено частково. Приклад дослідження фільтрації з використанням програми "Kust" по одному з розрізів показано рис. 10.

Розрахунки стійкості укосів дамб каналу проведено по розрахунковим схемам, які побудовано відповідно до скорегованих інженерно-геологічних розрізів і складено за матеріалами інженерно-геологічних та гідрологічних досліджень, проведених ВАТ "Укрводпроект", та матеріалів виконаних досліджень. Відповідно ДБН В.1.1.3-97 "Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення" для безпеки

функціонування об'єкта, який експлуатується, величина коефіцієнта стійкості окремих ділянок повинна складати не менше 1.25 (п. 3.11).

Після введення до ПК необхідної інформації (положення в розрізах інженерно-геологічних елементів, даних прогнозованого рівня ґрунтових вод, розрахункових характеристик ґрунтів, навантажень на гребінь каналу та ін.) та запуску програми, виконуються розрахунки стійкості укосів по сотнях поверхонь ковзання. До друку видаються дані коефіцієнта стійкості по десятках поверхонь ковзання, для яких величина коефіцієнта стійкості є меншою з усієї сукупності. Серед сотень поверхонь ковзання обчислювальна програма знаходить найбільш імовірну поверхню, для якої коефіцієнт стійкості найменший.

Для вирішення задач стійкості укосів для окремих перерізів будують розрахункову схему. Вона складається з геометричного образу, подібного до вказаного розрізу, для якого задано геометрію інженерно-геологічних елементів (ІГЕ). Геометрію ІГЕ представлено у виді визначеної послідовності відрізків і вузлових точок, що оконтурюють ІГЕ в прийнятій системі координат. Дія механізмів у межах їх розміщення для окремої схеми задається окремими елементами з ґрунту, вага яких по підшві відповідає заданим навантажнням.

Область обводнювання на розрахунковій схемі задається за матеріалами досліджень безупинною сукупністю відрізків у виді замкнутої ламаної лінії, що з'єднують кінці цих відрізків.

Аналіз даних розрахунків по моделям з врахуванням запропонованих заходів дає можливість стверджувати наступне:

- якісний протифільтраційний екран, закритий горизонтальний дренаж, відкритий дренажний канал та привантаження укосів дамб каналу чи автомобільної дороги підвищують величину коефіцієнта стійкості укосів по ймовірній поверхні ковзання до необхідної нормативної величини;

- при виході з ладу закритого горизонтального дренажу величина коефіцієнта стійкості укосів дещо зменшується, але не опускається нижче критичної величини.

Пружно-деформований стан укосів каналу досліджували на ПК з використанням програмного комплексу Placsis. На рис. 11 показано розвиток значних величин дотичних напружень у підшві укосів каналу після вилуговування гіпсу в прошарку суглинків.

На основі проведених досліджень і розрахунків запропоновано для проектування основні види протифільтраційних заходів і споруд:

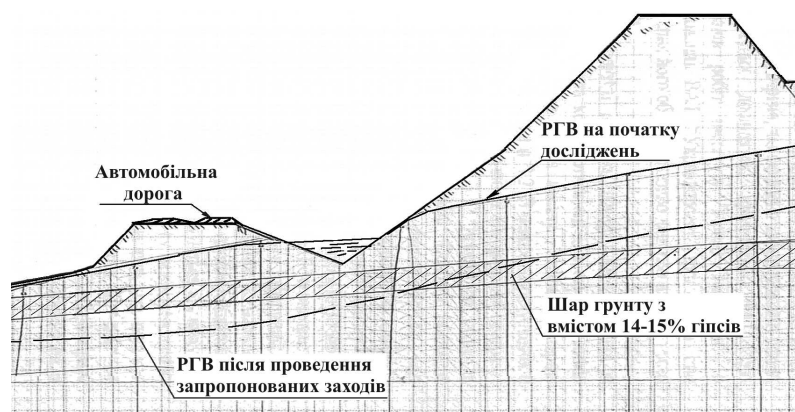


Рис. 10. Положення кривої депресії в укосах каналу на початку проведення досліджень і після рекомендованих заходів

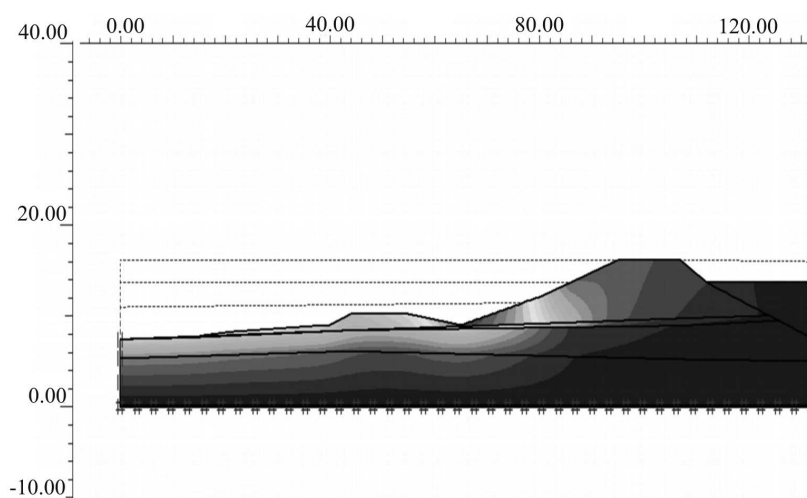


Рис. 11. Концентрація дотичних напружень у підшві укосу дамби каналу

- влаштування піско-цементного екрану під бетонним покриттям каналу. Екран було створено за рахунок закачування під тиском до 4 атмосфер піско-цементного розчину у свердловини, що розбурювались в плитах кріплення;

- привантаження зовнішнього укосу дамби каналу ґрунтовою призмою;

- будівництво відкритого дренажного каналу;

- реконструкція закритого дренажного колектора з виносом його за межі дамби.

Аналіз матеріалів спостережень за рівнем ґрунтових вод та динамікою нестаціонарного фільтраційного потоку, положенням нестаціонарних рівнів ґрунтових вод до і після проведених заходів, дані візуальних обстежень ділянки і стану укосів дамб каналу, показники мінералізації і хімічного складу ґрунтових вод та виконані співставлення дають

можливість стверджувати:

- після влаштування протифільтраційних заходів рівні ґрунтових вод на один і той же час зменшились на 2.0–3.0 м;

- зменшується мінералізація ґрунтових вод і спостерігається зміна хімічного складу осаду – з хлоридно-сульфатно-кальцієво-магнієво-натрієвого на сульфатний натрієво-кальцієвий.

Аналіз динаміки рівнів та гідрохімічного складу ґрунтових вод у дамбі і приканальній зоні дає право стверджувати, що проведені протифільтраційні заходи дали позитивні результати і дамба каналу на сьогодні знаходиться в задовільному стані.

ВИСНОВКИ

1. Кінетика розчинення солей в ґрунті має зовнішньо-дифузний механізм, процес якого залежить від швидкості фільтрації і початкового об'ємного вмісту солей в ґрунті. На підставі експериментальних досліджень отримано залежність між коефіцієнтом розчинення мінералу і швидкістю фільтрації та початковим об'ємним вмістом солі в ґрунті.

2. Міцність ґрунтів значно зменшується до початку розвитку суфозії та виносу солей тільки в наслідок підвищення вологості ґрунту. Таке зменшення міцності в залежності від початкової щільності ґрунту може перевищувати 50 %. В подальшому, при фільтрації і розвитку суфозії (виносу солей), міцність незв'язного ґрунту зменшується ще на 10–15 %.

3. Вплив суфозії ґрунту, особливо в випадках наявності солей в прошарках, суттєво впливає на пружно-деформований стан та стійкість укосів дамб каналів.

1. Баклушин М.Б., Рекс Л.М., Хлебникова И.Б. К задаче рассоления в среде с гетерогенным поровым пространством. – Ташкент: В сб.: ТашПИ, 1972. – Вып. 85. с.60–68
2. Голованов А.И., Новиков О.С. Математическая модель переноса влаги и растворов солей в почвогрунтах на орошаемых землях. – М.: Труды МГМИ, 1974. – Т. 36. с.87–95
3. Паренчик Р.И., Сафонов В.Ф. Гидрохимические параметры для условий сазово-солончаковой зоны Зжизакской и голодной степей. – Ташкент: Труды САНИИРИ, 1976. – Вып. 148. – с.70–75
4. Духовный В.А., Баклушин М.Б., Томин Е.Д. и др. Горизонтальный дренаж орошаемых земель. – М.: Колос, 1979. – 255 с.
5. Технические условия и нормы на проектирование, возведение и эксплуатацию земляных насыпных плотин (проект). – М.: Гипроводхоз, 1959. – 200 с.
6. Крайнов С.Р., Швец В.М. Гидрохимия. – М.: Недра, 1992. – 463 с.
7. Білеуш А.І., Фрідріхсон В.Л., Кривоног О.І. та ін. Патент України № 68380. Прилад крутіння. – К.: Бюл. N 6, 2012. – 5 с.
8. Білеуш А.І., Литвинчук Т.В., Омельченко І.А. Протиаварійні заходи на ділянці Північно-Кримського каналу (162 км), де в ґрунтових основах розповсюджені гіпси // Прикладна гідромеханіка. – 2006. – Т. 8 (80), №2. – С. 3-8.